

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS  
NATIONAL BOARD OF PATENTS REGISTRATION

Helsinki 2.11.2000

PCT/FI 00 / 00824

10-089161

REC'D 21 NOV 2000

WIPO

PCT

ETUOIKEUSTODISTUS  
PRIORITY DOCUMENT



Hakija  
Applicant

Valtion teknillinen tutkimuskeskus  
Espoo

Patenttihakemus nro  
Patent application no

19992092

Tekemispäivä  
Filing date

29.09.1999

Kansainvälinen luokka  
International class

G01J

Keksinnön nimitys  
Title of invention

"Spektrometri ja menetelmä optisen spektrin mittaamiseksi"

Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä, patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the description, claims, abstract and drawings originally filed with the Finnish Patent Office.

Marketta Tehikoski  
Apulaistarkastaja

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Maksu 300,- mk  
Fee 300,- FIM

Osoite: Arkadiankatu 6 A  
P.O.Box 1160  
FIN-00101 Helsinki, FINLAND

Puhelin: 09 6939 500  
Telephone: + 358 9 6939 500

Telefax: 09 6939 5328  
Telefax: + 358 9 6939 5328

## Spektrometri ja menetelmä optisen spektrin mittaamiseksi

### Keksinnön ala

Keksintö kohdistuu spektrin mittaukseen. Erityisesti keksinnön kohteena on menetelmä optisen spektrin mittaamiseksi ja spektrometri.

### 5 Keksinnön tausta

Spektrometrejä käytetään optisen säteilyn intensiteetin aallonpituusjakauman analysointiin. Skannaavissa hila- ja prismamonokromaattoreissa mitattava säteily tuodaan laitteen sisään ns. tuloaosta ja säteily hajotetaan eli dispersoidaan hilan ja prisman avulla niin, että yksi aallonpituuskaista kerrallaan johdetaan yksittäiselementtidetektorille ja mitattavan säteilyn intensiteettispektri rekisteröidään suoraan hilan tai peilin liikkeen funktiona. Laite mittaa vain yhtä aallonpituuskaistaa kerrallaan ja näin ollen hukkaa suurimman osan käytettävissä olevasta optisesta tehosta ja laitteessa tarvittava erittäin tarkka mekaaninen liike ja sen mittaus on kallis toteuttaa, ikääntyy käytössä, on herkkä lämpölaajenemiselle, liialle ja värinälle. Hilan liikkeen epämääräisyys ja siitä johtuva aallonpituusasteikon ryömintä on suurin virhetekijä käytettäessä laitteita pitkäaikaisesti näytteiden kemiallisen koostumuksen kvantitatiiviseen tai kvalitatiiviseen analyysiin NIR alueella (Near InfraRed).

Fourier Transform Infra Red (FTIR) -laitteissa mitattava säteily johdetaan Michelson-interferometrin lävitse, jonka optisten haarojen määräämää optista matkaeroa muutetaan liikkuvan peilin avulla mittauksen aikana. Interferometrin läpäisseen säteilyn intensiteetti mitataan optisen matkaron funktiona yksittäiselementtidetektorin avulla ja näin saatua intensiteettijakaumaa optisen matkaron funktiona kutsutaan interferogrammiksi. Säteilyn intensiteettispektri lasketaan interferogrammista Fourier-muunnoksella. FTIR-laite mittaa kaikki aallonpituudet samanaikaisesti. Tämän ns. multipleksausetunsa vuoksi FTIR-laite tuottaa merkittävästi skannaavaa hilamonokromaattoria paremman signaalikohinasuhteen, mikäli detektorin kohina on dominoiva kohinalähde, kuten se lähes aina IR-alueella on. Koska tekniikka vaatii liikkuvan peilin sisältämän interferometrin, on se äärimmäisen herkkä ympäristön tuottamille häiriöille kuten värinälle ja lämpötilan vaihteluille. Lisäksi näytteen liikkeestä johtuva modulaatio tuottaa häiriötä liikkuvaa näytettä mitattaessa.

Skannaava hilamonokromaattori voidaan toteuttaa ilman mekaanisen liikkeen ongelmia luomalla hila akustisen aallon avulla ns. AOTF-komponentissa (Acousto Optical Tunable Filter). Skannaus suoritetaan muut-

tamalla hilavakiota ja siten sen kulmadispersiota akustisen aallon taajuutta muuttamalla. Tämä tekniikka on kuitenkin kallista, sen lävitse saatava optisen tehon määrä on pieni eikä sillä saavuteta multipleksauseta.

Hilaspektrografissa tulorako kuvataan hilan kautta monielementtisen (esim. 16 - 1024) rividetektorin pinnalle niin, että tuloraon kuvan paikka rividetektorilla siirtyy rivin pituussuunnassa (elementiltä toiselle) aallonpituuden funktiona, jolloin detektorin elementit rekisteröivät kukin omaa aallonpituuskaistaansa. Näin toteutetussa spektrografissa ei tarvita liikkuvia osia ja sillä saavutetaan multipleksausetu. Kuitenkin IR-alueella tekniikan tarvitsema rividetektor on kallis, minkä lisäksi tarvitaan signaalin ilmaisuun kallis ja vaativa lukuelektroniikka. Aallonpituusalueen tai resoluutiovaatimuksen muuttuessa joudutaan usein kalliiseen uuden rividetektorin kehityskierrokseen. Absorptiospektroskopiaan perustuvissa pitoisuusmittalaitteissa sovelletaan ns. suhdemittausta, jolla eliminoidaan säteilylähteen lämpötilan, mittausgeometri-

an, sironnan ja detektorin vasteen muutoksia laskemalla ennuste mitattavan aineen pitoisuudelle mitattavan aineen absorptioaallonpituudella ja sen vierestä valitulla referenssiaallonpituudella mitattujen intensiteettien suhteesta, jolloin aallonpituudesta riippumattomat "kerrointyyppiset" virheet eliminoiduvat jakolaskussa. Koska rividetektorin eri elementtien aallonpituusvasteet ovat valmistusprosessin epätäydellisyydestä johtuen erilaiset, niiden lämpötilat vaihtelevat hieman eri tahtiin, syntyy tästä aallonpituudesta ja ajasta riippuvaa virhettä. Tämän vuoksi rividetektorin lämpöstabilointi on huomattavasti yksittäiselementtidetektorin stabilointia vaikeampaa ja tämä johtaa kalliisiin ja raskaisiin ratkaisuihin laitetoteutuksessa.

Uudentyyppisiä, halpaan hintaan tähtääviä spektrometrejä on toteutettu moduloimalla aallonpituusselektiivisesti eri aallonpituuskanavia hila-spektrografin rividetektorin tilalle sijoitetulla piimikromekaanisella peilimatriisilla (DMD, Deformable Micromirror Device) tai muun tyyppisellä spatiaaliseen modulointiin soveltuvalla komponentilla. Moduloidut optiset signaalit kuvataan detektorille ja mitattavien aallonpituuskanavien intensiteetit ilmaistaan moduloimalla detektorin mittaamasta signaalista. Koska aallonpituudet toisistaan erottava hila levittää tuloraon kuvan modulaattorin pinnalle, on myös siitä edelleen muodostettava kuva suuri, joten toteutettava laite vaatii suuren pinta-alan omaavan detektorin, joka on kallis, usein vaikeasti saatavissa ja jonka kapasitanssi on myös suuri, mikä johtaa hitaaseen detektorin toimintaan. Myös tässä ratkaisussa detektorin lämpötilariippuvuus on ongelma ja lämpötilasta-

bilointia tarvitaan. Tällaista ratkaisua on kuvattu tarkemmin julkaisussa Batchelor, J., D., Jones, B., T.: Development of a Digital Micromirror Spectrometer for Analytical Atomic Spectrometry, Analytical Chemistry, Vol. 70, No. 23, s. 4907 - 4914, December 1, 1998, joka otetaan tähän viitteeksi.

- 5           Erittäin halpoja miniatyyrispektrografeja on toteutettu suurissa sarjoissa massatuotantotekniikoilla (LIGA yms. ), mutta niiden ongelmana on heikkolaatuisista optisista pinnoista siroava, kaikkia aallonpituuksia sisältävä hajavallo, joka leviää rividetektorin pinnalle ja muodostaa tason, jota pienempiä optisia tehoja ei voida luotettavasti havaita. Tämä rajoittaa mitattavissa olevaa
- 10 absorboivan aineen pitoisuuden vaihtelualuetta. LIGA-tekniikkaa on selitetty tarkemmin esimerkiksi julkaisussa P. Kripper, J. Mohr, C. Müller, C. Van der Sel, Microspectrometer for the Infrared Range, SPIE vol. 2783, pages 277 - 282, 1996, mikä otetaan tähän viitteeksi. Lisäksi LIGA-tekniikkaa on selitetty tarkemmin myös julkaisussa Handbook of Microlithography, Micromachining,
- 15 and Microfabrication, P. Rai-Choudhury, editor, vol. 2 Micromachining, and Microfabrication, pages 237 - 377, 1997.

### Keksinnön lyhyt selostus

- Keksinnön tavoitteena on siten toteuttaa menetelmä ja menetelmän toteuttava spektrometri siten, että yllä mainitut ongelmat saadaan ratkaistua.
- 20 Tämän saavuttaa johdannossa esitetyn tyyppinen menetelmä optisen säteilyn spektrin mittaamiseksi spektrometrillä. Menetelmässä valaistetaan spektrometrin tulorako optisella säteilyllä ja kuvataan tulorako optiselle modulaattorille, joka käsittää moduloivia elementtejä; hajotetaan dispersiivisellä komponentilla tuloraon kuva spektriksi siten, että kukin spektrin aallonpituus muodostaa tulorasta oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin elementeillä riippuu
- 25 aallonpituudesta; moduloidaan dispersoitua tuloraon kuvaa ainakin yhdellä optisen modulaattorin elementillä, jolloin muodostuu ainakin yksi tuloraon kuvasta moduloitu aallonpituuskaista; kohdistetaan ainakin yksi moduloitu aallonpituuskaista dispersiiviselle komponentille, jolla koostetaan ainakin yhdestä
- 30 moduloiduista aallonpituuskaistasta dispersioton mittaussäteily siten, että kuvaa muodostettaessa kaikilla eri aallonpituuksilla tuloraon kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituudesta riippumatta; kuvataan dispersiottoman mittaussäteilyn avulla tulorako lähtörakoon; detektoidaan lähtöraosta saatava mittaussäteily yhdellä detektorilla, joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi
- 35 mittaussignaaliksi; demoduloidaan sähköinen mittaussignaali eri aallonpituuskaistojen aikaansaamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja

mitataan ainakin yhtä aallonpituuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

Keksinnön kohteena on myös spektrometri optisen spektrin mittaamiseksi. Spektrometri käsittää: tuloraon, ainakin yhden dispersiivisen komponentin, ainakin yhden kuvaavan komponentin, optisen modulaattorin, lähtöraon ja yhden detektorin ja spektrometrissa tulorako on sovitettu rajoittamaan spektrometriin tulevan optisen säteilyn ja kuvaava komponentti on sovitettu kuvaamaan tuloraon modulaattorille, joka käsittää moduloivia elementtejä; dispersiivinen komponentti on sovitettu hajottamaan tuloraon kuvan spektriksi siten, että kukin spektrin aallonpituus muodostaa tuloraosta oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin elementeillä riippuu aallonpituudesta; optinen modulaattori on sovitettu moduloimaan dispersoitua tuloraon kuvaa ainakin yhdellä optisen modulaattorin elementillä ainakin yhden tuloraon kuvasta moduloidun aallonpituuskaistan muodostamiseksi; dispersiivinen komponentti on sovitettu koostamaan ainakin yhdestä moduloidusta aallonpituuskaistasta dispersiottoman mittaussäteilyn siten, että kuvaa muodostettaessa kaikilla eri aallonpituuksilla tuloraon kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituudesta riippumatta; kuvaava komponentti on sovitettu kuvaamaan mittaussäteilyn avulla tulorako lähtörakoon; yksi detektori on sovitettu detektoimaan lähtöraosta tulevaa mittaussäteilyä ja muuntamaan mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaalksi; spektrometri on sovitettu demoduloimaan sähköisen mittaussignaalin eri aallonpituuskaistojen aiheuttamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja spektrometri on sovitettu mittamaan ainakin yhtä aallonpituuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

Keksinnön edulliset suoritusmuodot ovat epäitsenäisten patenttivaatimusten kohteena.

Keksintö perustuu siihen, että käytetään yhtä pientä detektoria spektrin sarjamuotoiseen detektointiin. Pientä detektoria voidaan käyttää, koska dispersoitu spektri koostetaan dispersiivisellä komponentilla siten, että eri aallonpituuskomponenteilla tulorako kuvautuu samaan paikkaan, ja koostettu mittaussignaali voidaan fokusoida pienelle detektorille. Lisäksi näytteen kuvaamisen sijasta tulorako kuvataan modulaattorille ja modulaattorilta tulorako kuvataan lähtörakoon.

Keksinnön mukaisen menetelmällä ja järjestelmällä saavutetaan useita etuja. Koska ratkaisussa käytetään dispersoivaa komponenttia kahdesti, mittaussignaali voidaan koostaa dispersoituneesta spektristä ja kuvata läh-

törakoon hyvin pieneksi tuloraon kuvaksi, mikä mahdollistaa yhden, pinta-  
 alaltaan pienen detektorin käytön. Pienen detektorin kapasitanssi on pieni ja  
 nopeus suuri, mikä mahdollistaa suuren sarjamuotoisen analysointinopeuden.  
 Myös aallonpituusvaste yhdellä detektorilla on eri aallonpituuksilla ajallisesti  
 5 muuttumaton. Koska makroskooppisesti liikkuvia osia ei tarvita, spektrometrin  
 rakenne- ja toiminta on stabiilia ja ympäristösietoista ja spektrometri voidaan  
 toteuttaa käyttäen hinnaltaan edullisia komponentteja, jotka ovat kulumatto-  
 mia. Keksinnön mukainen ratkaisu on mahdollista integroida miniatyyrispek-  
 troskoopiksi, jossa spektrometrin rakenteen avulla hajavalon vaikutusta on te-  
 10 hokkaasti vähennetty.

### Kuvioiden lyhyt selostus

Keksintöä selostetaan nyt lähemmin edullisten suoritusmuotojen  
 yhteydessä, viitaten oheisiin piirroksiin, joissa

- 15 kuvio 1A esittää spektrometrin lohkokaaviota,
- kuvio 1B esittää spektrometrin lohkokaaviota,
- kuvio 2A esittää spektrometrin konfiguraatiota,
- kuvio 2B esittää spektrometrin konfiguraatiota,
- kuvio 3 esittää spektrometrin konfiguraatiota,
- 20 kuvio 4A esittää optisten kuitujen käyttöä spektrometrissä,
- kuvio 4B esittää kuitukimpun päätä,
- kuvio 5A esittää kuvaavan linssin ja hilan sijoittelua spektrometris-  
 sa,
- kuvio 5B esittää kuvaavan linssin ja hilan yhdistämistä spektromet-  
 rissa,
- 25 kuvio 6 esittää läpäisevän optisen modulaattorin käyttöä spektro-  
 metrissa,
- kuvio 7A esittää optista modulaattoria, joka heijastaa optista sätei-  
 lyä, ja
- 30 kuvio 7B esittää optista modulaattoria, joka läpäisee optista sätei-  
 lyä.

### Keksinnön yksityiskohtainen selostus

Keksinnön mukainen mittausmenetelmä ja spektrometri soveltuvat  
 erityisesti läpäisy- ja heijastusmittauksiin, joilla määritetään esimerkiksi ainei-  
 den pitoisuuksia, paksuuksia tai lämpötilaa, näihin kuitenkin rajoittumatta.  
 35 Keksinnön mukaisella ratkaisulla voidaan toteuttaa sähköisesti ohjattava, ha-

lutulla tavalla valittavat, jyrkkäreunaiset päästö- ja estokaistat omaava suodatin, jollaista tarvitaan esimerkiksi tutkimuslaitteissa. Lisäksi keksinnöllistä ratkaisua voidaan soveltaa esimerkiksi automaattisissa prosessianalysaattoreissa ja sensoreissa, joissa tärkeää on muun muassa edullinen hinta, pieni koko ja immuniteetti ympäristön vaikutuksille.

Tarkastellaan aluksi keksinnön mukaista ratkaisua kuvion 1A avulla. Se, tarvitseeko spektrometri optisen tehonlähteen 100, riippuu sovelluksesta. Jos näyte 102 on esimerkiksi itsesäteilevä, optista tehonlähdettä 100 ei välttämättä tarvita. Optisena tehonlähteenä voidaan käyttää laajakaistaista tehonlähdettä kuten aurinkoa, päivänvaloa, hehkulankalamppua, halogeenilamppua, kaasupurkauslamppua jne. Joissain sovelluksissa voidaan käyttää myös kapeampaa optista kaistaa, joka saavutetaan suodattamalla laajakaistasäteilyä tai käyttämällä optisena tehonlähteenä esimerkiksi erilaisia lasereita ja ledejä. Optisella säteilyllä tässä hakemuksessa tarkoitetaan sellaista säteilyä aallonpituusalueella, joka tyhjiössä alkaa ultraviolettisäteilystä (noin 40 nm) ja jatkuu kaukoinfrapuna-alueelle (noin 1 mm).

Näyte 102 sijaitsee tässä ratkaisussa tuloraon 104 edessä. Näytteestä 102 säteily emittoituu, heijastuu tai siroaa spektrometrin tulorakoon 104, joka rajoittaa spektrometriseen mittaukseen tulevaa säteilyä. Rako 104 on tyypillisesti suorakaiteen muotoinen kooltaan esimerkiksi  $20\ \mu\text{m} - 1000\ \mu\text{m} \times 1\ \text{mm} - 15\ \text{mm}$ , vaikka aukon 104 muoto ja koko eivät olekaan keksinnön kannalta erityisen oleellisia. Keksinnön mukaisessa ratkaisussa rako 104 kuvataan kuvaavalla elementillä, jonka optinen komponentti 106 käsittää, optiselle modulaattorille 108. Kuvauksen lisäksi aukosta 104 tuleva säteily hajotetaan spektriaksi dispersiivisellä komponentilla, jonka myös optinen komponentti 106 käsittää. Dispersiivisenä komponenttina voi toimia prisma tai hila. Dispersiossa hilalle pätee likimain, että lähtökulman ja tulokulman erotus kerrottuna hilavakiolla on aallonpituuden kertaluku eli kaavana  $a(\sin\theta_m - \sin\theta_i) = m\lambda$ , missä  $a$  on hilavakio,  $\theta_m$  on lähtökulma,  $\theta_i$  on tulokulma. Prismen dispersio perustuu siihen, että prisman suhteellinen taitekerroin  $n$  on aallonpituuden  $\lambda$  funktio. Prismen taittumislaista  $\sin\alpha - n(\lambda)\sin\beta = 0$  nähdään, että tulokulman sinifunktion  $\sin\alpha$  suhde lähtökulman sinifunktioon  $\sin\beta$  on sama kuin suhteellinen taitekerroin  $n$ , joka riippuu aallonpituudesta. Näin dispersioiva komponentti suuntaa eri aallonpituisen optisen säteilyn eri kulmiin. Kuvaavana elementtinä voi toimia linssi, linssiyhdistelmä, peili, peiliyhdistelmä tai linssi(e)n ja peili(e)n yhdistelmä sinänsä tunnetulla tavalla.

Modulaattorina 108 on edullisesti sähköisesti ohjattava spatiaalinen optisen säteilyn modulaattori, jota on tarkemmin kuvattu kuviossa 7. Modulaattori 108 käsittää esimerkiksi pieniä läpäiseviä tai heijastavia elementtejä, joiden läpäisyä tai heijastusta voidaan erikseen muuttaa. Optisen komponentin

5 106 dispersiiviseltä komponentilta kohdistuu kullekin läpäisevälle tai heijastavalle elementille tietty kapea spektrin osa eli aallonpituuskaista. Modulaattorilla 108 voidaan aallonpituuskaistoja moduloida eli tietyllä ajanhetkellä modulaattorilla 108 voidaan valita muita aallonpituuskaistoja vaimentamalla ainakin yksi optisen komponentin 106 dispersiivisen komponentin tuottama aallonpituus-

10 kaista, joka etenee edelleen optisen komponentin 106 dispersiiviselle komponentille. Dispersiivisellä komponentilla spektraalisiin komponentteihin hajotetun optisen säteilyn osuessa toistamiseen samaan tai ainakin toiseen samanlaiseen dispersiiviseen komponenttiin säteilyn dispersiivisyys poistuu eli spektraalisten komponenttien dispersiosta johtuva suunnan kulmajakauma

15 poistuu. Tällä tavalla keksinnön mukaisessa ratkaisussa dispersiivinen komponentti ensin dispersoi optisen säteilyn ja sama tai eri dispersiivinen komponentti koostaa yhdestä tai useammasta aallonpituuskaistasta mittaussäteilyn. Mittaussäteilyllä muodostetussa kuvassa eri aallonpituuksien kuvat tuloraosta ovat oleellisesti samassa paikassa. Lohkossa 106 modulaattorilta 108 tuleva

20 optinen mittaussäteily myös kuvataan lähtörakoon 104, joka voi olla sama tai eri kuin tulorako. Tuloraosta 104 optinen säteily etenee detektorille ja edelleen mittaussäteiläisiin detektointi- ja mittauslohkossa 110. Modulaattorin 108 ja detektointi- ja mittauslohkon 110 toimintaa ohjaa ohjausyksikkö 112.

Kuviossa 1B on muutoin samanlainen keksinnöllisen spektrometrin

25 lohkokaavio, mutta tässä ratkaisussa näytteen 102 ja tuloraon 104 sijainti on eri. Näyte 102 sijaitsee tässä esimerkissä tuloraon 104 edessä. Tässä ratkaisussa ei voida käyttää itsesäteilevää näytettä. Muutoin mittaustoiminta ja spektrometrin osat ovat oleellisesti samanlaiset.

Kuviossa 2A on kuvattu keksinnön mukaista ratkaisua, jossa näyte

30 ei ole itsesäteilevä. Optisesta tehonlähteestä 200 optinen säteily kohdistetaan näytteen 202 pintaan. Näytteestä 202 optinen säteily heijastuu ja siroaa tulorakoon 204, josta optinen säteily edelleen kohdistuu koveraan peiliin 206, joka käsittää hilan 2062. Hila 2062 on esimerkiksi kuvioitu esimerkiksi holografisesti, fotolitografialla tai suoraan mekaanisesti työstämällä peilin 206 pintaan si-

35 nänsä tunnetulla tavalla. Peili 206 kuvaa tuloraon 204 tasopeilin 208 kautta optiselle modulaattorille 210. Optinen modulaattori 210 valikoi tai moduloi ai-



ka,- taajuus- tai koodijakoisesti aallonpituuskaistat, jotka optinen modulaattori 210 heijastaa tasopeilin 212 kautta takaisin koveraan peiliin 206. Optinen modulaattori 210 on esimerkiksi pieniä peilielementtejä käsittävä DMD-komponentti. Poikkeutusoptiikkana tarvitaan peilejä 208 ja 212, jotka mahdollistavat samanlaisen optiikan (dispersoiva komponentti 2062 ja kuvaava optinen komponentti 206) käyttämisen optisen modulaattorin 210 molemmiin puolin niin, että tuloraon 204 kuva muodostuu tuloraon 204 vieressä olevaan lähtörakoon 214. Peilejä 208 ja 212 tarvitaan, jotta tulorako 204 ja lähtörako 214 voitaisiin fyysisesti erottaa toisistaan heijastuskulman avulla. Koverassa peilissä 206 oleva hila koostaa aallonpituuskaistat mittaussäteilyksi ja kovera peili 206 heijastaa ja fokusoi mittaussäteilyn lähtörakoon 214, jossa oleva detektori 216 ottaa mittaussäteilyn vastaan ja muuntaa optisen mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliksi. Keksinnön kaikille toimintamuodoille on yhteistä, että hilaviivojen on oltava tulo- ja lähtörakojen kanssa samansuuntaisia, jotta spektrometri toimisi oikein, koska spektri jakautuu hilaviivojen suuntaa vastaan kohtisuoraan. Kuviossa 2A tämä tarkoittaa sitä, että optisella modulaattorilla aallonpituusjakauma on paperin pinnan normaalin suuntainen. Keksinnöllisessä ratkaisussa on oleellista myös se, että vaikka detektorin detektointipinta-ala on pieni, tavallisesti korkeitaan muutamia mm<sup>2</sup>, tuloaukko kuvataan oleellisesti kokonaan detektorille. Tällä tavalla keksinnöllinen ratkaisu ei hukkaa optista tehoa ohi detektorin. Keksinnöllisessä ratkaisussa eroteltavien aallonpituuskaistojen määrä N on tavallisesti  $N = 4 - 1000$ . Yhden aallonpituuskaistan leveys keksinnöllisessä ratkaisussa on tyypillisesti nanometristä muutamaa kymmeneen nanometriin siihen kuitenkaan rajoittumatta. Saavutettava aallonpituusresoluutio  $\Delta\lambda$  on näinollen hyvä. Detektorioptiikan puoliavauskulma on noin 35°, mikä on ainakin yhtä hyvä kuin parhaimmilla tunnetuilla spektrometreillä. Detektorille saatava irradianssi eli tehotiheys on verrannollinen tuloon  $L \cdot \Delta\lambda \cdot \Omega$  missä  $L$  = mitattavan säteilyn spektraalinen radianssi,  $\Delta\lambda$  = aallonpituuskaistan (kanavan) leveys (nm),  $\Omega$  = avaruuskulma, jonka tuleva säteily detektorista katsottuna täyttää.  $L$  ja  $\Delta\lambda$  määräytyvät sovellukselle ominaisista rajoituksista, mutta käytettävä laitetekniikka määrää maksimiarvon  $\Omega$ :lle. Koska  $\Omega$  on verrannollinen tulevan säteilyn puoliavaumakulmaan, detektorille saatava tehotiheys riippuu voimakkaasti käytetystä optiikkaratkaisusta.

Sähköinen mittaussignaali siirretään edelleen automaattiseen signaalinkäsittely- ja analysointilaitteeseen (ei esitetty kuviossa 2A), jossa mittaussignaalia suodatetaan ja aallonpituuskaistatietoja käsitellään automaatti-

sella tietojenkäsittelylaitteistolla. Näytteestä 202 voidaan mitata spektrianalyysin avulla esimerkiksi pinnoitteen paksuutta. Tällöin voidaan mitata esimerkiksi paperin pinnassa olevan kaoliinin tms. paksuutta. Modulaattorin 210 toimintaa ohjaa ohjausyksikkö 218, joka on toiminnallisesti yhdistetty muuhun mittaus-

5 laitteistoon.

Kuviossa 2B on esitetty mittausjärjestelyn periaate, jossa näyte 230 on itsesäteilevä. Näytteen 230 säteilemä optinen säteily etenee tuloraon 232 kautta peilin 234 ja hilan 2062 yhdistelmälle. Aallonpituuskaistoikseen hajotettu optinen säteily muodostaa tuloraon kuvan peilin 236 kautta modulaattorille 238, joka moduloi optista säteilyä ja heijastaa moduloidut aallonpituuskaistat peilin 240 kautta peilin 234 ja hilan 2062 yhdistelmälle. Hilan 2062 koostama ja peilin 234 fokusoima optinen mittaussignaali kuvautuu lähtörakoon 242, jossa detektori 244 detektoi optisen mittaussignaalin ja muuntaa sen sähköiseksi tietojen käsittelyä varten. Vaikka keksinnöllisessä ratkaisussa on luonnollisesti aina lähtörako 242, erillistä lähtörakokomponenttia ei välttämättä tarvita, vaan lähtörakona 242 voi toimia detektori 244 esimerkiksi siten, että detektoiva pinta tms. määrittää lähtöraon. Myös tässä spektrometrijärjestelyssä mittausta ohjaa mittausyksikkö 246.

Kuviossa 3 keksinnön mukaista järjestelyä on kuvattu hieman tarkemmin käyttäen esimerkkinä läpivalaistavaa näytettä. Optisen tehonlähteen 300 säteilyä kerätään optisella elementillä 302, joka voi olla linssi, linssiyhdistelmä, peili tai peiliyhdistelmä, ja kohdistetaan kerätty optinen säteily näytteen 304. Näytteestä heijastunut, läpimennyt ja/tai sironnut säteily kerätään tulorakoon 308 optisella elementillä 306, joka myös voi olla linssi, linssiyhdistelmä, peili tai peiliyhdistelmä. Keksinnöllisessä ratkaisussa optinen elementti 306 on toteutettu edullisesti Köhler-optiikalla. Tässä ratkaisussa tuloraosta 308 tuleva optinen säteily kollimoidaan eli yhdensuuntaistetaan koveran peilin 310 avulla ja heijastetaan hilalle 312. Hila 312 heijastaa spektriä hajotetun optisen säteilyn toiselle koveralle peilille 314, joka kuvaa tuloraon tasopeilin 316 kautta optiselle modulaattorille 318. Optisesta modulaattorista 318 moduloitu optinen säteily heijastetaan toisen tasopeilin 320 kautta takaisin koveralle peilille 314, joka kollimoi hajaantuvan optisen säteilyn hilalle 312. Hila 312 koostaa aallonpituuskaistoista mittaussäteilyn ja heijastaa mittaussäteilyn koveralle peilille 310, joka lopulta kuvaa tuloraon 308 lähtörakoon 322. Optinen elementti 324 kuvaa tuloraon 322 detektorille 326, joka detektoi optisen mittaussignaalin.

Kuviossa 4A ja 4B on esitetty ratkaisu, jossa tulorako ja lähtörako ovat kuitukimpun pää. Tämä ratkaisu yksinkertaistaa oleellisesti tulo- ja lähtöraon ja optisen modulaattorin välistä optiikkaa, mahdollistaa suuren numeerisen aukon käytön ja se on helposti sovellettavissa näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueille. Kuitukimpusta 400 optinen säteily kohdistetaan koveraan peiliin 402, joka käsittää myös hila 401. Peili 402 kuvaa kuitukimpun pääns optiselle modulaattorille 404. Kukin optisen modulaattorin 404 elementti 406 näkee eri aallonpituuskaistan muodostaman kuvan kuitukimpun päästä (kaksi eri aallonpituuskaistaa on esitetty kuvassa yhtenäisellä viivalla ja katkoviivalla).

Optisen modulaattorin 404 elementit 406 heijastavat moduloidun kuvan takaisin koveralle peilille 402, jonka hila 401 koostaa modulaattorilta 404 heijastuneesta optisesta säteilystä mittaussäteilyä. Mittaussäteily heijastetaan takaisin kuitukimpun päähän, jolloin kuitukimpun kuva (tulorako) kuvautuu kuitukimpun päähän (lähtörako).

Kuviossa 4B on kuvattu kuitukimpun 400 päätä. Kuitukimppu 400 käsittää optista säteilyä lähettäviä kuituja 408 ja optista säteilyä vastaanottavia kuituja 410. Optinen teho syötetään lähettäviin kuituihin 408 optisesta tehonlähteestä 420 esimerkiksi optisen elementin 422 avulla, joka on linssi tai peili. Vastaanottokuiduista 410 optinen teho kohdistetaan detektorille 424 optisen elementin 426 avulla, joka on linssi tai peili. Lähettävät kuidut 408 ja vastaanottavat kuidut 410 on sekoitettu keskenään.

Kuviossa 5A on esitetty keksinnöllinen ratkaisu, jossa on hyödynnetty linssijä. Tuloraosta 500 optinen säteily osuu linssiin 502, joka kollimoi optisen säteilyn. Hila 504 dispersoi optisen säteilyn ja linssi 506 kuvaa tuloraon peilin 508 kautta optiselle modulaattorille 510. Moduloitu optinen säteily heijastuu peilin 512 kautta takaisin linssille 506, joka kollimoi optisen säteilyn. Hila 504 koostaa optisesta säteilystä mittaussäteilyn ja linssi 502 kuvaa optisen säteilyn lähtörakoon 514, johon muodostuu tuloraon 500 kuva. Mittaussäteilyn käsittely tästä eteenpäin on samanlaista kuin muiden kuvioiden tapauksessa.

Kuvio 5B on muutoin samanlainen kuin kuvio 5A, mutta tässä ratkaisussa kaksi linssiä 502, 506 ja hila 504 on yhdistetty. Linssin 516 pinnalla on tällöin hila 504, joka on valmistettu holografisesti tai fotolitografialla. Keksinnön mukaisessa ratkaisussa on tärkeää, että hila dispersoi yhdensuuntaista optista säteilyä, mikä on mahdollista, kun optinen säteily kollimoidaan tai kun hila sijaitsee tulorakoa modulaattorille kuvaavan linssin taittavassa pinnassa

tai tulorakoa modulaattorille kuvaavan peilin heijastavassa pinnassa kuten kaikissa hakemuksen kuvioissa on esitetty.

Kuviossa 6 on esitetty keksinnön mukainen ratkaisu, jossa optisen modulaattorin toiminta perustuu siihen, että optisen modulaattorin moduloivien elementtien optisen säteilyn läpäisyä muutetaan. Tässä ratkaisussa tuloraosta 600, joka on tässä esimerkissä kuitukimpun pää, optinen säteily kohdistetaan peiliin 602, joka käsittää myös dispersiivisen komponentin 601. Tuloraon spektriksi hajotettu optinen säteily kuvataan koveralla peilillä 602 optiselle modulaattorille 604. Moduloitu optinen säteily läpäisee optisen modulaattorin 604 ja optinen säteily hajaantuu toiselle dispersiiviselle komponentille 605, joka on samanlainen kuin ensimmäinen dispersiivinen komponentti 602. Dispersiivinen komponentti 605 on samassa yhteydessä kuin kovera peilikin 606, koostaa vastaanottamastaan ainakin yhdestä aallonpituuskaistasta mittaussäteilyä, jonka avulla peili 606 kuvaa tuloraon 600 kuvan modulaattorilta 604 lähtörakoon 608, joka tässä esimerkissä myös on kuitukimpun pää.

Kuviossa 7A ja 7B on esitetty heijastavan ja läpäisevän optisen modulaattorin periaatekuvat. Heijastavana optisena modulaattorina voi toimia esimerkiksi DMD. DMD-modulaattorin käyttö yhdessä dispersiivisen komponentin kanssa, joka sekä dispersoi että koostaa optista säteilyä, saa aikaan erittäin pienen hajasäteilytason detektorilla ja näin erittäin pienten optisten tehojen detektointi on mahdollista. Kuviossa 7A esitetty DMD-modulaattori käsittää joukon matriisimuodossa olevia mikropeilielementtejä 700, joita voidaan kutakin liikuttaa itsenäisesti. Mikropeilien koko on esimerkiksi  $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$  ja peilejä voi olla vaaka- ja pystysuunnassa satoja. Kun peilien suuntaa muutetaan, peileihin osunut optinen säteily heijastuu eri suuntiin kuten kohta 702 havainnollistaa tilannetta. Näin voidaan saada modulaattorille tullut optinen säteily heijastumaan halutulta osin detektorille. Kullakin modulaattorin elementillä on kaksi ääriarvoista tilaa, joihin elementti voidaan kytkeä: tila, jolloin elementti minimaalisesti vaimentaa detektorille menevää optista säteilyä, ja tila, jolloin elementti vaimentaa maksimaalisesti detektorille menevää optista säteilyä. Elementti voidaan yleensä kytkeä myös mihin tahansa tilaan näiden ääritilojen välissä. Kullakin elementillä voidaan siis moduloida detektorille menevää optista säteilyä ajan suhteen epäjatkevalla tai jatkuvalla funktiolla. Kuviossa 7A olevassa esimerkissä aallonpituus  $\lambda_1$  on suunnattu niin, että se etenee detektorille. Muut aallonpituudet  $\lambda_2 - \lambda_N$  on suunnattu niin, etteivät ne etene

detektorille. DMD-komponenttia on kuvattu tarkemmin US-patenttijulkaisussa 5504575, joka otetaan tähän viitteeksi.

Läpäisevänä optisena modulaattorina voi toimia esimerkiksi LC-komponentti (Liquid Crystal) kuten kuviossa 7B on esitetty. LC-komponentin toiminta perustuu optisen säteilyn polarisaatioon. Muuttamalla sähkökentän avulla nestekiteen kidemäistä rakennetta polarisoidun optisen säteilyn polarisaation suuntaa voidaan kiertää, mikä sinänsä on ammattimiehelle ilmeistä eikä sitä sen vuoksi tarvitse tässä yhteydessä selittää enempää. LC-modulaattorissa elementtien tiloja voidaan ohjata siten, että kunkin modulaattorin elementin vaimennus muuttuu ajan suhteen epäjatkovana, diskreettiarvoisena tai jatkuvana funktiona. Kuviossa 7B elementit 720 läpäisevät hyvin optista säteilyä ja elementit 722 taas vaimentavat voimakkaasti optista säteilyä. Tällöin parittomat aallonpituudet  $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$ , ... pääsevät detektorille, kun taas parilliset aallonpituudet  $\lambda_2$ ,  $\lambda_4$ , ... eivät pääse detektorille. Erityisesti intensiteettimodulaattoreina voidaan käyttää myös magneto-optisia, akusto-optisia ja mekaanisia modulaattoreita. Mekaaninen modulaattori voi olla esimerkiksi pyörivä kiekko, jossa on kutakin aallonpituuskaistaa varten läpäisevä alue eri etäisyydellä kiekon keskipisteestä.

Nestekidemodulaattorilla, jossa ei tällöin tarvitse käyttää hyväksi polarisaatiota, voidaan muuttaa myös kunkin elementin aallonpituuskaistan vaihetta. Aallonpituuskaistan sähkökentän vaihe muuttuu, kun nestekiteen kidemäistä rakennetta muutetaan sähkökentällä, jolloin nestekiteen taitekerroin muuttuu. Taitekertoimen muuttuminen vaikuttaa suoraan optisen säteilyn nopeuteen nestekiteessä, mikä saa aikaan sen, että kuljettuaan saman matkan eri nopeudella optisen säteilyn vaihe on muuttunut. Eri aallonpituuskaistat erotetaan toisistaan ilmaisun yhteydessä vaiheen perusteella.

Vaihetta voidaan moduloida myös optisen modulaattorin elementtinä olevan liikkuvan peilin avulla, jolloin kutakin elementtiä siirretään eri matka siten, että kunkin aallonpituuskaistan kulkema matka detektorille muuttuu aallonpituuden osan verran. Vaihe detektoidaan interferenssin avulla ammattimiehelle sinänsä ilmeisellä tavalla.

Optisen modulaattorin elementillä voidaan aallonpituuskaistan optista säteilyä moduloida siis siten, että muutetaan optisen säteilyn jotain ominaisuutta ajanfunktiona, jolloin eri elementtien moduloimat aallonpituuskaistat voidaan erottaa toisistaan vastaavalla tavalla demoduloimalla. Muutettavana ominaisuutena voi olla detektorille tulevan optisen säteilyn intensiteetti tai vai-

he. Yksinkertaisimmillaan modulaatio on sellainen, että keksinnöllisessä ratkaisussa käytettävälle yhdelle detektorille ohjataan yksi aallonpituuskaista kunkin ajanhetkenä. Tällainen ratkaisu toiminnan kannalta kuitenkin melko hidas.

- 5 Toisena vaihtoehtona on aaltomuotomodulaatio. Tällöin optisen modulaattorin eri elementtejä ohjataan siten, että eri aallonpituuskaistojen intensiteetit vaihtelevat detektorilla erilaisen jatkuvan tai epäjatkuvan funktion mukaan. Yksi näistä ratkaisuista on moduloida eri elementtejä eri taajuuksilla. Tällöin kyseessä on taajuusjakoinen multipleksaus. Kutakin aallonpituuskaistaa moduloidaan silloin eri taajuudella, mikä suoritetaan siten, että kukin modulaattorin elementti ohjataan värähtelemään tilasta toiseen eri modulointitaajuu-  
10 dulla. Modulointitaajuus saa aallonpituuskaistan kohdistumaan modulointitaajuu-  
della aallonpituuskaistojen yhteiseen detektoriin. Detektoinnin jälkeen aallonpituuskaistojen sähköiset signaalit erotetaan toisistaan demoduloimalla.  
15 Demodulointi voidaan suorittaa esimerkiksi erottamalla eritaajuiset modulointitaajuu-  
det suodattamalla toisistaan tai demodulointi suoritetaan käänteis-Fourier-muunnoksella (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform).

- Eritaajuisien ohjausfunktioiden sijasta voidaan eri elementtejä ohjata erilaisilla jaksollisilla funktioilla. Tällöin jakson aikana eri elementtien aal-  
20 lonpituuskaistat voidaan erottaa toisistaan funktion aaltomuodon perusteella. Yhtenä esimerkkinä tällaisesta on binaarinen koodimultipleksaus, joka on epäjatkua funktio. Tällöin kukin aallonpituuskaista koodataan modulaattorissa omalla koodillaan, mikä suoritetaan siten, että kutakin modulaattorin elementtiä kytetään ääritilasta toiseen esimerkiksi binaarikoodin mukaisesti. Yhdellä  
25 detektorilla detektoinnin jälkeen kukin aallonpituuskaista voidaan erikseen analysoida purkamalla koodaus. Esimerkkinä tällaisesta modulaatiosta on sinänsä tunnettu Hadamard-multipleksaus. Hadamard-muunnosta hyödyntävässä spektrometriassa käytetään tavallisesti monirakoriviä, mutta keksinnön mukaisessa ratkaisussa tarvitaan vain yksi lähtörako. Hadamard-  
30 multipleksausta on selitetty tarkemmin esimerkiksi patenttijulkaisuissa US 4615619, US 3859515 ja kirjassa Hadamard Transform Optics, Martin Harwit, Neil J. A. Sloane, Academic Press, 1979, jotka otetaan tähän viitteeksi.

- Aallonpituuskaistojen multipleksaus vaatii paljon detektorin dynamiikalta. Tilannetta voidaan helpottaa useilla tavoilla. Taajuus- ja koodimul-  
35 tipleksauksessa eri aallonpituuskaistat voidaan vaiheistaa siten, että yhden signaalin tehon laskiessa toisen mittaussignaalin teho nousee. Sellaiseen

spektriosaan kuuluvat aallonpituuskaistat, joita spektrin analysoinnissa ei tarvita, voidaan jättää moduloimatta, jolloin niiden pääsy detektorille estyy. Dynamiikkavaatimus pienenee myös silloin, kun varataan mittauksen kannalta tärkeille aallonpituuskaistojen viereen yksi tai useampi vapaa modulaation taajuuskaista. Erilaisia modulaatioita ja demodulaatioita ohjaa ohjausyksikkö 112.

Keksinnöllistä ratkaisua voidaan soveltaa esimerkiksi ainepitoisuusmittauksessa. Mitattavina aineina voivat olla nesteiden ja kaasujen lisäksi kiinteät aineet. Optisen säteilyn läpäisy  $T$  kullakin aallonpituudella  $\lambda$  riippuu yhden tai useamman aineen konsentraatiosta  $C_j$  ja absorptiokertoimesta  $\alpha_j$  ja absorptiomatkasta  $l$  seuraavan kaavan mukaisesti

$$\ln[T(\lambda)] = \left( \sum_{j=1}^N C_j \alpha_j \right) l,$$

missä  $j$  on ainekohtainen indeksi. Koska kukin modulaattorin moduloima aallonpituuskaista on keksinnön mukaisessa ratkaisussa kapeakaistainen, vastaa aallonpituus  $\lambda$  aallonpituuskaistaa. Kapeakaistaisuus tarkoittaa UV - VIS - IR - alueella (UltraVioletti - VISIBLE - InfraRed) tavallisesti korkeintaan muutamien kymmenien nanometrien kaistaa. Kaista on kapea myös silloin, kun yhden aallonpituuskaistan kaista on vain osa (esim. alle 2 %) koko mitattavasta aallonpituusalueesta. Mittaamalla läpäisy  $T$  ennalta tunnetulla matkalla  $l$  ja käyttämällä taulukoituja tietoja aineiden absorptiokertoimista  $\alpha_j$  voidaan kaavasta ratkaista ainekohtainen konsentraatio  $C_j$ . Mittalaite saadaan myös toimimaan siten, että laite kalibroidaan aluksi ainepitoisuuksiltaan tunnetulla näytesarjan mittauksilla ammattimiehelle sinänsä ilmeisellä tavalla. Tällöin absorptiokertoimia  $\alpha_j$  ja matkaa  $l$  ei tarvitse tuntea. Tyypillisiä pitoisuusmittauksia ovat esimerkiksi viljan proteiinipitoisuus, mittaushohteen kosteus (erityisesti paperin kosteus) ja kaasupitoisuus (esim. metaanipitoisuus).

Keksinnön mukaisella ratkaisulla voidaan mitata myös ainekerroksen paksuutta. Tyypillinen sovellus on esimerkiksi kaoliinikerroksen paksuus paperin päällä. Koska kaoliinilla on kapeakaistainen intensiteettihiippu ja paperin sellulla laajakaistainen tasainen intensiteettijakauma, kaoliinin paksuutta voidaan mitata vertaamalla kaoliinin intensiteettihiipun korkeutta tasaiseen sellun intensiteettijakaumaan ajan funktiona. Kun suhde muuttuu, muuttuu myös kaoliinikerroksen paksuus. Suhteen muutoksen suuruus ilmaisee ka-

oliinikerroksen paksuuden muutoksen. Vastaavalla tavalla voidaan mitata monenlaisten ainekerrosten paksuutta kuten muovikalvon paksuutta.

Sekä ainepitoisuuden että aineen paksuuden mittauksessa aallonpituuskaistojen intensiteettiasteikon 0-pisteen virhe riippuu laitetyypistä ja määrää alueen, jolla spektrografin mittaama vaimennus on lineaarisessa suhteessa todelliseen vaimennukseen. Spektrografeilla luonnollisesti tavoitellaan mahdollisen suurta konsentraation vaihtelualueen mittauskkyä ja tämä alue on suoraan verrannollinen alueeseen, jolla spektrografin mittaama absorptio on lineaarinen. Hilan tai muiden optisten komponenttien tuottaman hajavalon merkitys on erityisen suuri miniatyyritekniikoiden tapauksessa, sillä halvoilla massatuotantotekniikoilla valmistetut optiikat tuottavat korkean hajavalotason, mikä pienentää aallonpituuskaistojen intensiteetin mittauksessa dynamiikka-  
 10 aluetta. Keksinnöllisessä ratkaisussa spektrometrin rakenne (samanlaisen dispersoivan komponentin käyttö kahteen kertaan) vähentää hajavalon haittavaikutuksia huomattavasti.  
 15

Keksinnöllisellä ratkaisulla voidaan mitata myös lämpötilaa. Tällöin seurataan mustan kappaleen säteilyn Wienin lain mukaista käyttäytymistä. Musta kappale säteilee suurimmalla intensiteetillä aallonpituudella  $\lambda_{\max}$ , joka riippuu lämpötilan  $T$  neljännessä potenssista eli kaavan muodossa ilmaistuna  
 20  $\lambda_{\max} = \delta T^4$ , missä  $\delta$  on Stefan-Boltzmannin vakio. Mittaamalla aallonpituuskaistojen teho detektorilla aallonpituuden funktiona ja etsimällä suurin teho tiedetään suurimman intensiteetin aallonpituus  $\lambda_{\max}$ , josta voidaan laskea lämpötila kaavalla  $T = \left( \frac{\lambda_{\max}}{\delta} \right)^{\left( \frac{1}{4} \right)}$  ammattimiehelle sinänsä tunnetulla tavalla. Erilaisia  
 25 spektrin analyysijä ja mittauksia suorittaa detektointi- ja mittausyksikkö 110.

Käytetyt optiset komponentit voivat perustua tavanomaiseen taitta-  
 25 vaan optiikkaan (kuperat ja koverat linssit ja peilit) tai diffraktio-optiikkaan (Fresnel-linssit ja binaarioptiset komponentit). Spektrometrin tuotannossa suurin osa hinnasta syntyy kuitenkin lasista valmistetuista optisista komponenteista. Spektrometrin valmistuskustannuksia ja kokoa voidaan pienentää toteuttamalla spektrometri tasoaaltojohteella, LIGA-tekniikalla ja puristemuovi-  
 30 optiikalla. LIGA-tekniikka perustuu röntgen-litografiaan, elektroformaukseen ja valamiseen ja LIGA-tekniikalla valmistettuja spektrografin optisia komponentteja voidaan käyttää erityisesti lähi-infrapuna-alueella. Näin saadaan aikaan miniatyyrispektrometri, joka voidaan valmistaa yhdelle integroidulle piirille  
 35 ja integroida helposti osaksi lähes mitä tahansa tutkimus- tai mittalaitetta. Kek-



sinnön mukaisessa ratkaisussa voidaan hajasäteilyn vaikutusta oleellisesti vähentää, mikä johtuu spektrometrin rakenteesta, jossa yhdenlaista dispersoivaa komponenttia käytetään sekä optisen säteilyn hajottamiseen spektriä että eri aallonpituisten optisen säteilyn aallonpituuskaistojen kokoamiseen samansuuntaisiksi ja optisen modulaattorin käytöstä.

Elektroniset piirit voidaan toteuttaa kovoratkaisuna piirilevyllä, joka käsittää erillisiä elektroniikkakomponentteja, tai edullisemmin esimerkiksi VLSI-komponenteilla (Very Large Scale Integrated circuit) tai ASIC-piiritekniikalla (Application Specific Integrated Circuit). Automaattinen tietojenkäsittely voidaan keksinnön mukaisessa ratkaisussa suorittaa PC-tietokoneessa tai toteuttaa muuten ohjelmana, joka suoritetaan prosessorissa.

Vaikka keksintöä on edellä selostettu viitaten oheisten piirustusten mukaiseen esimerkkiin, on selvää, ettei keksintö ole rajoittunut siihen, vaan sitä voidaan muunnella monin tavoin oheisten patenttivaatimusten esittämän keksinnöllisen ajatuksen puitteissa.

## Patenttivaatimukset

1. Menetelmä optisen säteilyn spektrin mittaamiseksi spektrometrillä, tunnettu siitä, että

- valaistaan spektrometrin tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) optisella säteilyllä ja kuvataan tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) optiselle modulaattorille (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604), joka käsittää moduloivia elementtejä;
  - hajotetaan dispersiivisellä komponentilla (106, 2062, 312, 401, 504, 601) tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuva spektriä siten, että kukin spektrin aallonpituus muodostaa tuloraosta (104, 204, 232, 308, 500, 600) oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementeillä riippuu aallonpituudesta;
  - moduloidaan dispersoitua tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvaa ainakin yhdellä optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementillä, jolloin muodostuu ainakin yksi tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvasta moduloitu aallonpituuskaista;
  - kohdistetaan ainakin yksi moduloitu aallonpituuskaista dispersiiviselle komponentille (106, 2062, 312, 401, 504, 605), jolla koostetaan ainakin yhdestä moduloiduista aallonpituuskaistasta dispersioton mittaussäteily siten, että kuvaa muodostettaessa kaikilla eri aallonpituuksilla tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituudesta riippumatta;
  - kuvataan dispersiottoman mittaussäteilyn avulla tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514);
  - detektoidaan lähtöraosta (104, 214, 242, 322, 514) saatava mittaussäteily yhdellä detektorilla (110, 216, 244, 326, 424), joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaali;
  - demoduloidaan sähköinen mittaussignaali eri aallonpituuskaistojen aikaansaamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja
  - mitataan ainakin yhtä aallonpituuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että valaistaan tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) näytteestä (102, 202, 230, 304) tulevalle optiselle säteilylle.

3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että valaistaan näyte (102, 202, 230, 304) mittaussäteilyllä ja kuvataan näytteestä (102, 202, 230, 304) tulevan mittaussäteilyn avulla tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514).

5 4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja moduloidaan erilaisilla aaltomuodoilla ja mittauksen yhteydessä eri aallonpituuskaistat erotetaan toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla.  
10

5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja multipleksataan aikajakoisesti ja mittauksen yhteydessä eri aallonpituuskaistat erotetaan toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla.  
15

6. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja multipleksataan taajuusjakoisesti ja mittauksen yhteydessä eri aallonpituuskaistat erotetaan toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla tai suodattamalla taajuuudet erilleen toisistaan.  
20

7. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja multipleksataan koodijakoisesti ja mittauksen yhteydessä eri aallonpituuskaistat erotetaan toisistaan koodausta vastaavalla dekoodauksella.  
25

8. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että mittauksessa käytetään vain yhtä dispersiivistä komponenttia (106, 2062, 312, 401, 504, 601).

30 9. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että määritetään mitatun ainakin yhden aallonpituuskaistan avulla ainakin yhden aineen pitoisuus näytteessä (102, 202, 230, 304).

10. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että määritetään mitatun ainakin yhden aallonpituuskaistan avulla ainekerroksen paksuus näytteessä (102, 202, 230, 304).

11. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, 5 että määritetään mitatun ainakin yhden aallonpituuskaistan avulla näytteen (102, 202, 230, 304) lämpötila.

12. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että detektori (110, 216, 244, 326, 424) muodostaa lähtöraon (104, 214, 242, 322, 514).

10 13. Spektrometri optisen spektrin mittaamiseksi, tunnettu siitä, että spektrometri käsittää: tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600), ainakin yhden dispersiivisen komponentin (106, 2062, 312, 401, 504, 601, 605), ainakin yhden kuvaavan komponentin (106, 206, 234, 314, 402, 506, 516, 602, 606), optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604), lähtöraon (104, 15 214, 242, 322, 514) ja yhden detektorin (110, 216, 244, 326, 424) ja

- spektrometrissa tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) on sovitettu rajoittamaan spektrometriin tulevan optisen säteilyn ja kuvaava komponentti (106, 206, 234, 314, 402, 506, 516, 602) on sovitettu kuvaamaan tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) modulaattorille (108, 210, 238, 318, 406, 20 510, 604), joka käsittää moduloivia elementtejä;

- dispersiivinen komponentti (106, 2062, 312, 401, 504, 601) on sovitettu hajottamaan tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvan spektriksi siten, että kukin spektrin aallonpituus muodostaa tuloraosta (104, 204, 232, 308, 500, 600) oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin (108, 210, 25 238, 318, 406, 510, 604) elementeillä riippuu aallonpituudesta;

- optinen modulaattori (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) on sovitettu moduloimaan dispersoitua tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvaa ainakin yhdellä optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementillä ainakin yhden tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvasta moduloidun aallonpituuskaistan muodostamiseksi; 30

- dispersiivinen komponentti (106, 2062, 312, 401, 504, 605) on sovitettu koostamaan ainakin yhdestä moduloidusta aallonpituuskaistasta dispersiottoman mittaussäteilyn siten, että kuvaa muodostettaessa kaikilla eri

aallonpituuksilla tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituudesta riippumatta;

- kuvaava komponentti (106, 206, 234, 314, 402, 506, 516, 606) on sovitettu kuvaamaan mittaussäteilyn avulla tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514);

- yksi detektori (110, 216, 244, 326, 424) on sovitettu detektoimaan lähtöraosta (104, 214, 242, 322, 514) tulevaa mittaussäteilyä ja muuntamaan mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliaksi;

- spektrometri on sovitettu demoduloimaan sähköisen mittaussignaalin eri aallonpituuskaistojen aiheuttamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja

- spektrometri on sovitettu mittamaan ainakin yhtä aallonpituuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

14. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu valaisemaan tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) näytteestä (102, 202, 230, 304) tulevalla optisella säteilyllä.

15. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu valaisemaan näyte (102, 202, 230, 304) mittaussäteilyllä ja kuvaamaan näytteestä (102, 202, 230, 304) tuleva mittaussäteily lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514).

16. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja moduloidaan erilaisilla aaltomuodoilla ja spektrometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuskaistat toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla.

17. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja multipleksataan aikajakoisesti ja spektrometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuskaistat toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla.

18. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja multipleksataan taajuusjakoisesti ja  
5 spektrometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuskaistat toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla tai suodatuksella.

19. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuskaistoja multipleksataan koodijakoisesti ja spek-  
10 trometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuskaistat toisistaan koodausta vastaavalla dekodauksella.

20. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri käsittää vain yhden dispersiivisen komponentin (106,  
15 2062, 312, 401, 504, 601).

21. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on valmistettu yhdelle integroidulle piirille.

22. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu määrittämään mitatun ainakin yhden aal-  
20 lonpituuskaistan avulla ainakin yhden aineen pitoisuus näytteessä (102, 202, 230, 304).

23. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu määrittämään mitatun ainakin yhden aal-  
25 lonpituuskaistan avulla ainekerroksen paksuus näytteessä (102, 202, 230, 304).

24. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu määrittämään mitatun ainakin yhden aal-  
lonpituuskaistan avulla näytteen (102, 202, 230, 304) lämpötila.

25. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että detektori (110, 216, 244, 326, 424) on lähtörako (104, 214, 242, 322,  
30 514).

### (57) Tiivistelmä

Keksinnön kohteena on menetelmä optisen säteilyn spektrin mittaamiseksi ja menetelmän toteuttava spektrometri. Keksinnöllisessä ratkaisussa spektrometrin tulorako (104) valaistetaan optisella säteilyllä. Optinen komponentti (106) kuvaa optisella säteilyllä tuloraon (104) optiselle modulaattorille (108) ja hajottaa optisen säteilyn spektriä. Spektriä moduloidaan optisella modulaattorilla (108). Optinen komponentti (106) koostaa spektristä dispersiotonta mittaussäteilyä ja kuvaa mittaussäteilyn käsittämän tuloraon (104) lähtörakoon (104), joka voi olla sama tai eri kuin tulorako (104). Lähtöraosta (104) detektoidaan mittaussäteilyä detektorilla (110), joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaalksi. Mittaussignaali demoduloidaan eri aallonpituuskaistojen aikaansaamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan ja spektrometri mittaa ainakin yhtä aallonpituuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla, jota voidaan käyttää näytteen ominaisuuksien määrittämiseen.

(Kuvio 1A)

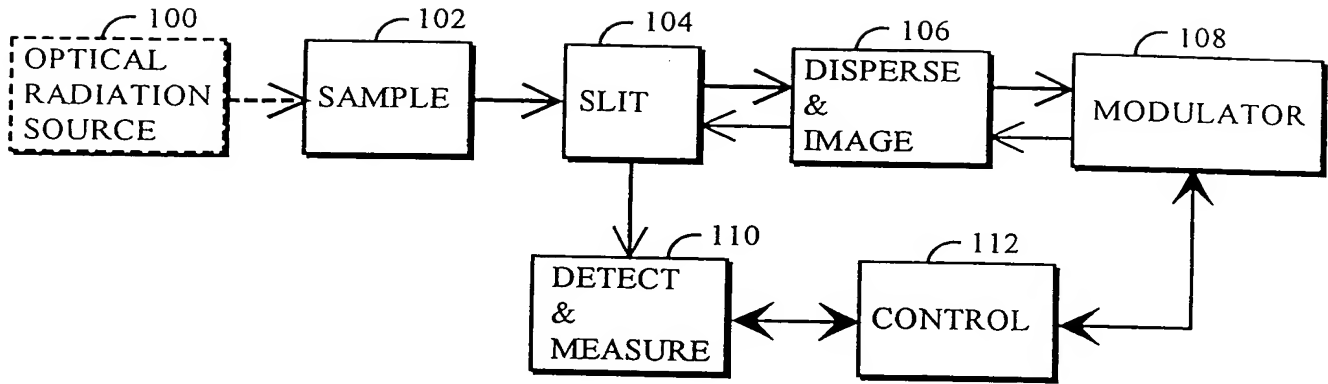


FIG. 1A

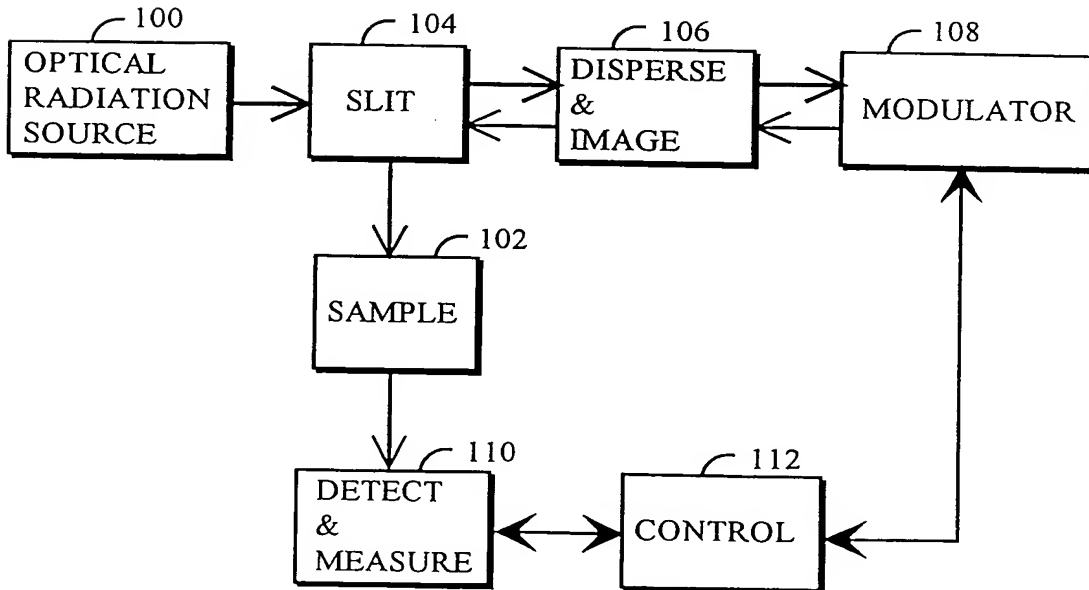


FIG. 1B



2/6

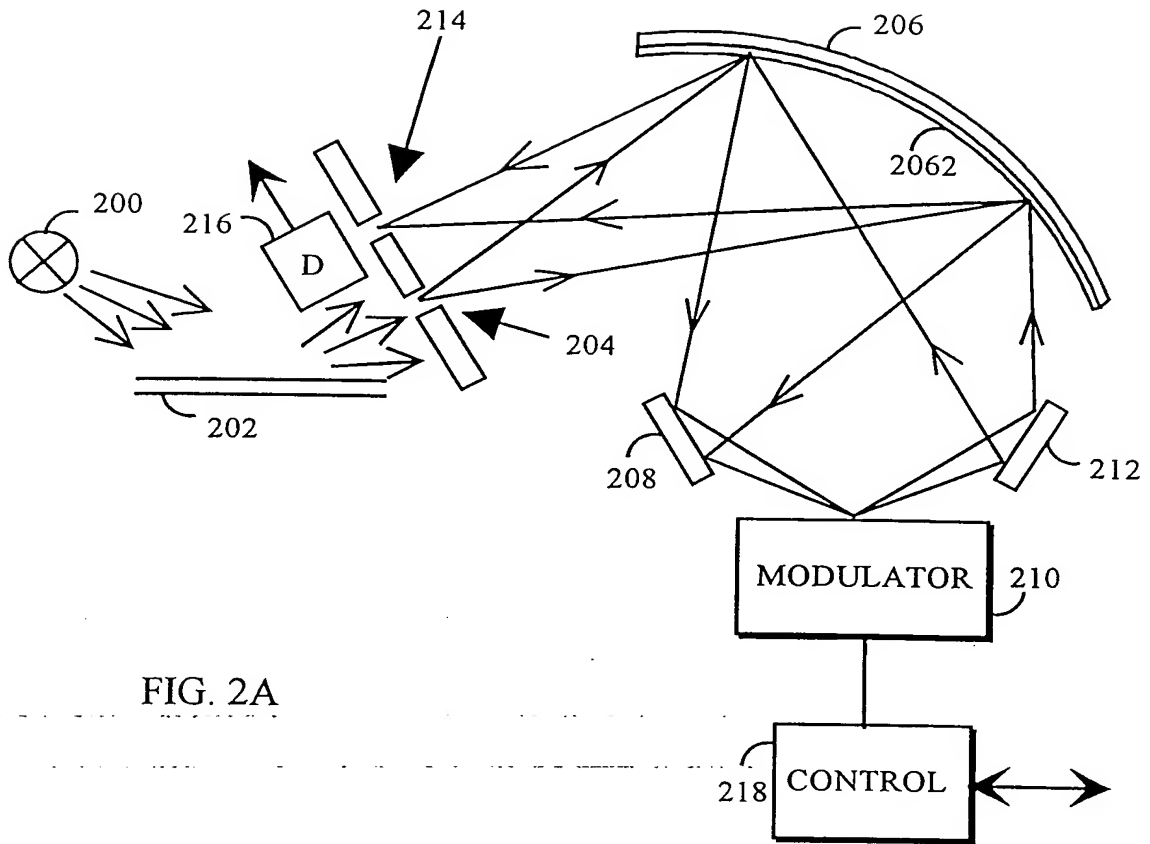


FIG. 2A

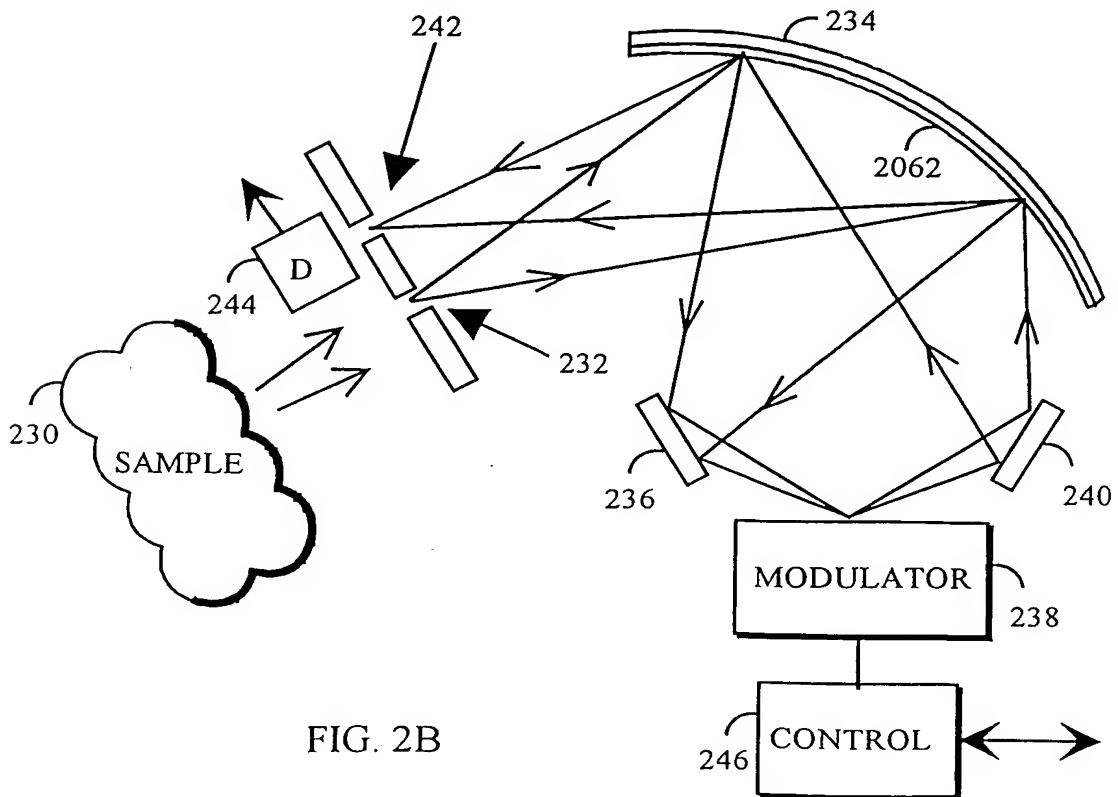


FIG. 2B

3/6

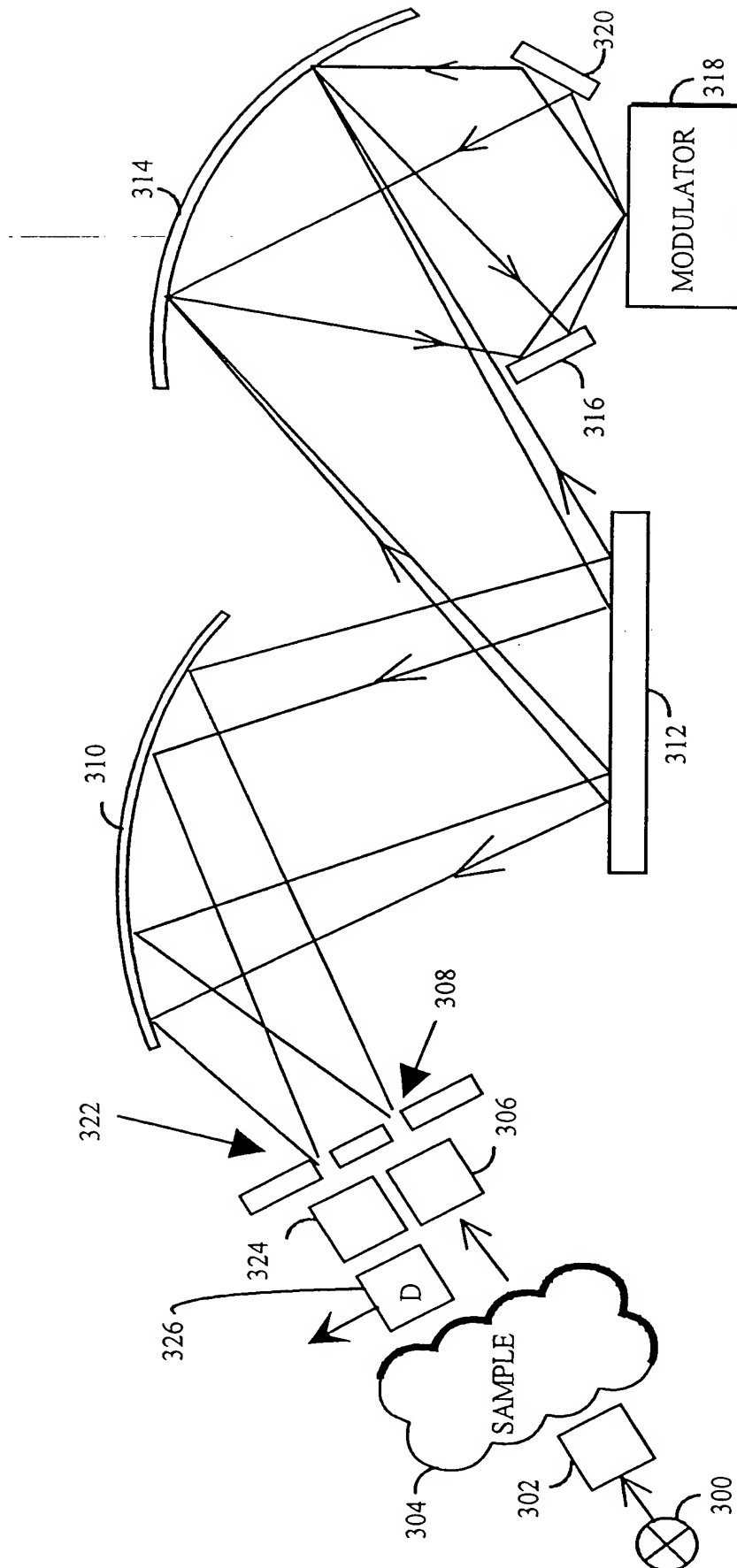
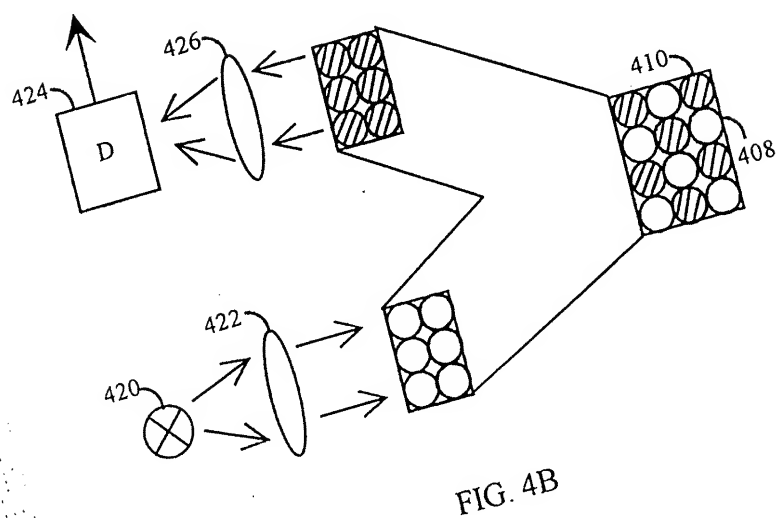
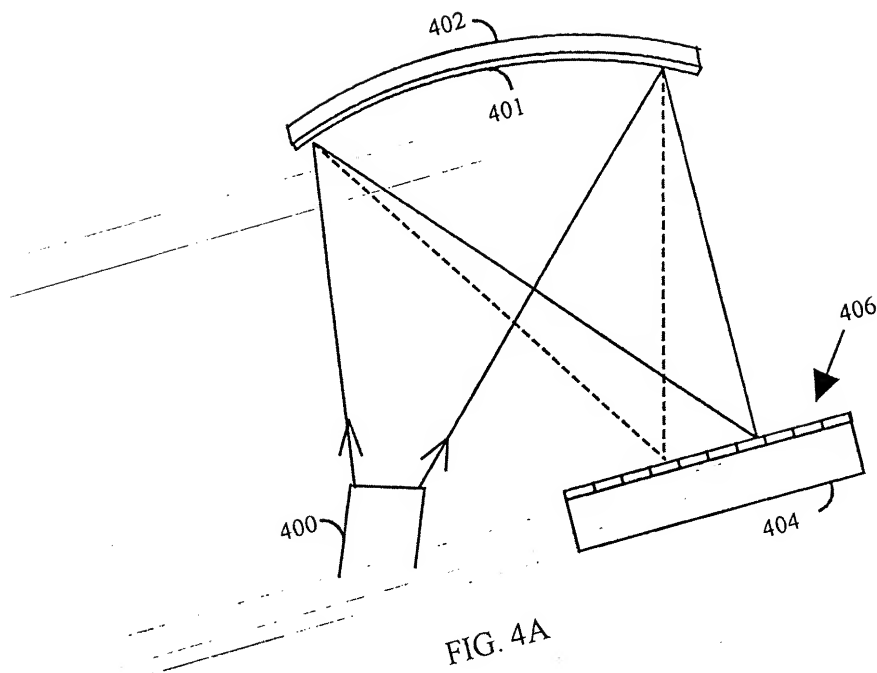


FIG. 3



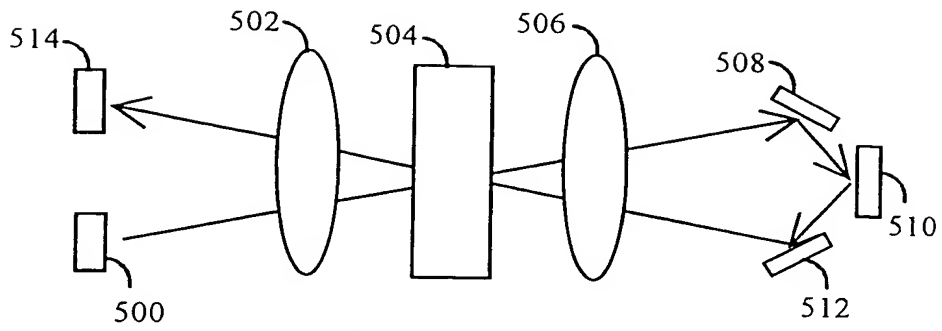


FIG. 5A

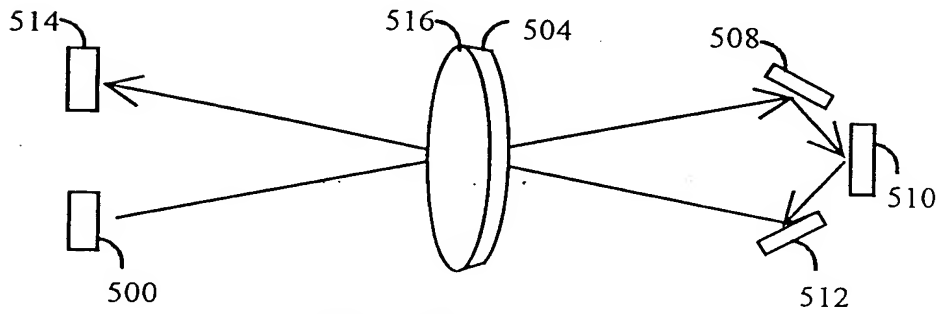


FIG. 5B

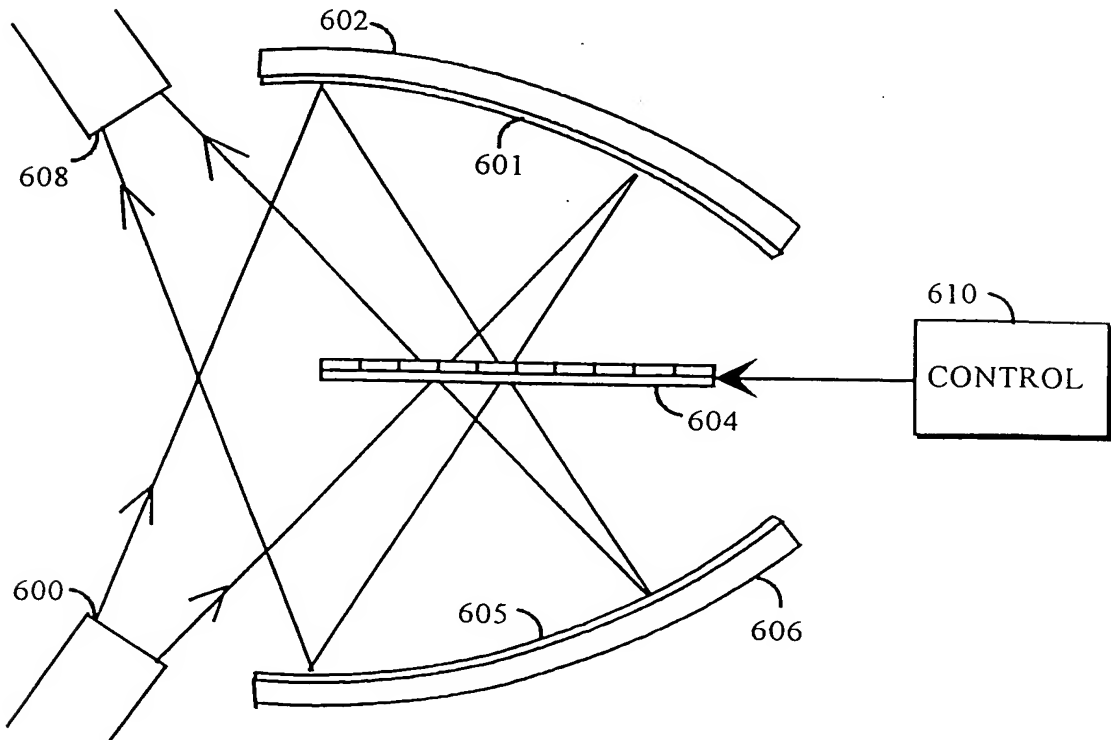


FIG. 6

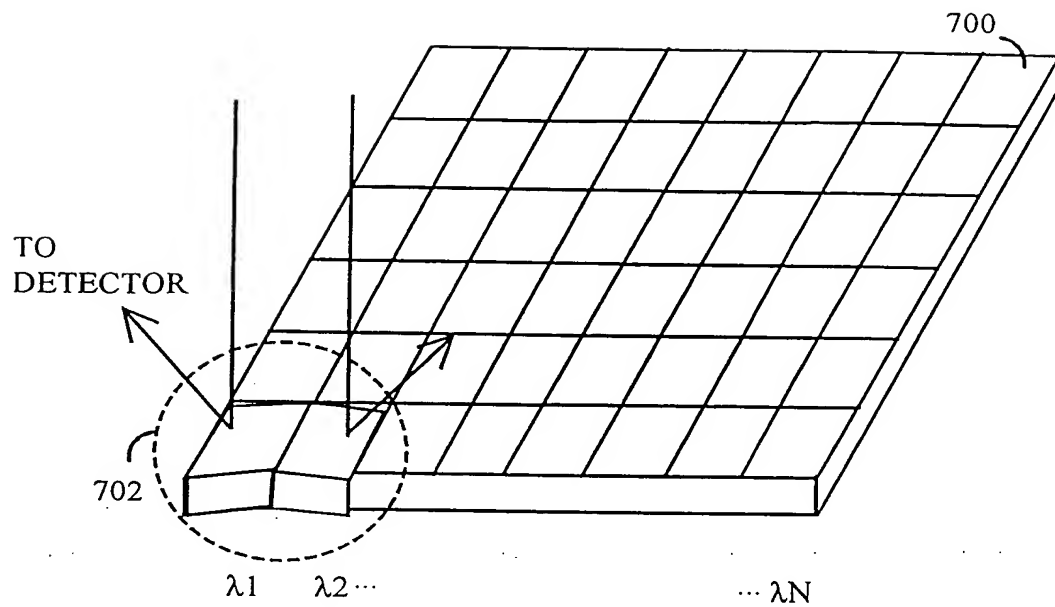


FIG. 7A

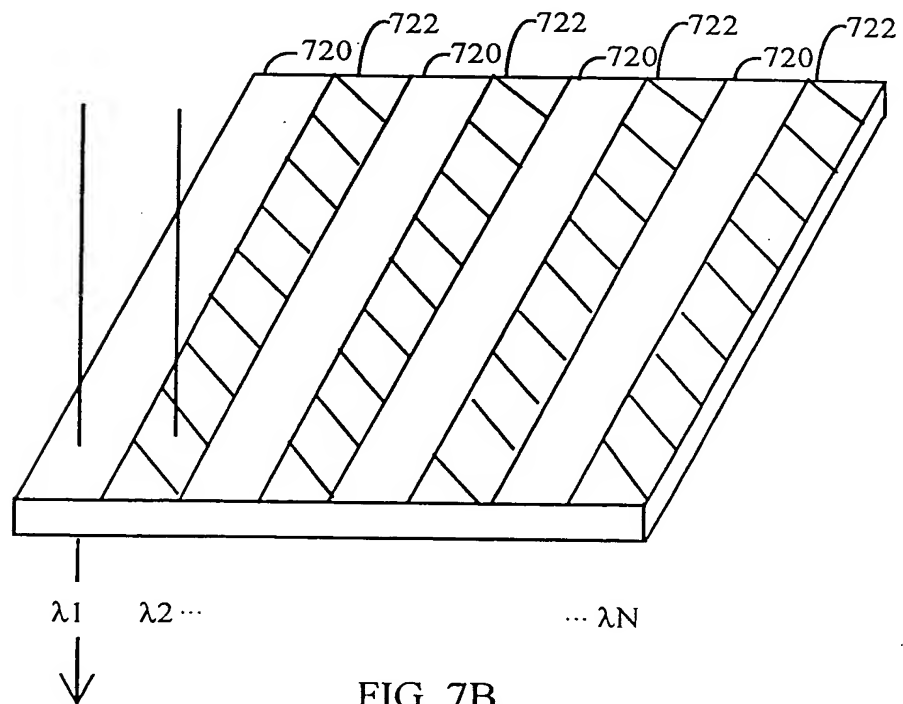


FIG. 7B

